



**UNIVERSIDAD DE CUENCA**

**Facultad de Ingeniería**

**Escuela de Ingeniería Civil**

**“COMPARACIÓN DE MÉTODOS DE INTERPOLACIÓN GEOESTADÍSTICOS  
CON Y SIN VARIABLES AUXILIARES PARA LA PRECIPITACIÓN ANUAL  
(2003-2008) EN ECUADOR”**

Tesis de graduación previa a la obtención del título de Ingeniero Civil

**Autor:**

Daniel Fernando Pérez Paredes

C.I. 0104565668

**Directora:**

Daniela Ballari, PhD

C.I. 1751894716

**CUENCA – ECUADOR**

**2016**

## RESUMEN

Este trabajo compara los métodos de interpolación geoestadísticos kriging ordinario (sin variables auxiliares) y kriging universal (con variables auxiliares) en el análisis del comportamiento de la precipitación anual del Ecuador en el período 2003-2008. Las variables auxiliares exploradas son imágenes satelitales, en particular las imágenes de precipitación trmm, fracción de nubosidad, contenido de agua en las nubes, temperatura en la parte superior de las nubes, presión en la parte superior de las nubes, temperatura del suelo y modelo digital de elevaciones. El método consiste en tres etapas. Primero, se realiza la interpolación de precipitación anual sin variables auxiliares (kriging ordinario). Segundo, la interpolación con las variables auxiliares (kriging universal). Para seleccionar las variables auxiliares adecuadas se utiliza regresión lineal múltiple. Tercero, se aplica validación cruzada para evaluar la efectividad de las interpolaciones. Los resultados de la validación cruzada muestran el mejor método de interpolación fue kriging universal con la variable auxiliar trmm, seguido por la combinación trmm y contenido de agua en las nubes. Con estas variables auxiliares, además, se minimiza la desviación estándar de la interpolación, produciendo una desviación estándar homogénea en todo el país e inferior a la interpolación sin variables auxiliares. Finalmente, las variables auxiliares permiten representar la variabilidad de la precipitación en la Amazonia, donde las estaciones meteorológicas son escasas.

**Palabras claves:** geoestadística, kriging, variables auxiliares, precipitación

---

## ABSTRACT

The study compares two geostatistical methods for interpolation, ordinary kriging (without secondary variables) and universal kriging (with secondary variables), in the analysis of the distribution of the annual precipitation of Ecuador in the period 2003-2008. The secondary variables explored are satellite images, being selected for the study images of precipitation trmm, cloud fraction, cloud water content, cloud top temperature, cloud top pressure, soil temperature and digital elevation model. The method of study consist in three stages. First, the interpolation without secondary variables of annual precipitation is made (ordinary kriging). Second, the interpolation with secondary variables (universal kriging). To select the right secondary variables, multiple linear regression is applied. Third, cross validation is used in order to evaluate the goodness of the interpolations. The cross validation results showed that the best method for interpolation was universal kriging with trmm, followed nearly by the combination of trmm and cloud water content. With these secondary variables, also, the standard deviation of the interpolation is minimized, generating a homogenous deviation all across the country. This deviation is inferior at the one generated by the interpolation without secondary variables. Finally, the secondary variables allowed to represent the variability of the precipitation in the Amazon, region with a lack of stations.

**keywords:** geostatistics, kriging, covariables, precipitation

## INDICE

RESUMEN .....	2
ABSTRACT .....	3
ÍNDICE DE TABLAS .....	6
ÍNDICE DE FIGURAS .....	8
CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL .....	9
CLÁUSULA DE DERECHO DE AUTOR .....	10
DEDICATORIA.....	11
AGRADECIMIENTO.....	12
CONTENIDO.....	13
1. INTRODUCCIÓN .....	13
2. TRABAJOS RELACIONADOS .....	15
3. MATERIALES.....	17
3.1. Descripción de la zona de estudio .....	17
3.2. Descripción de la información de las estaciones meteorológicas .....	19
3.3. Descripción de las variables auxiliares .....	21
4. MÉTODOS.....	23
4.1. Interpolación sin variables auxiliares: Kriging Ordinario .....	23
4.1.1. Variograma.....	24
4.2. Interpolación sin variables auxiliares: Inverso de la Distancia .....	26
4.3. Interpolación con variables auxiliares: Kriging Universal .....	27
4.3.1. Regresión Lineal Múltiple.....	27
4.4. Validación Cruzada .....	28
4.5. Implementación en R .....	28



---

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	31
5.1. Interpolación Kriging Universal.....	31
5.1.1. Correlación.....	31
5.1.2. Regresión Lineal Múltiple .....	33
5.1.3. Interpolación sin y con variables auxiliares .....	34
5.2. Validación Cruzada .....	37
6. CONCLUSIONES .....	39
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	40
8. ANEXOS.....	42
8.1 Anexo A .....	42

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág
<b>Figura 1.</b> Área de estudio con las regiones costa, sierra y oriente delimitadas por la curva de nivel de 1 000 m.s.n.m., según NGDC.....	17
<b>Figura 2.</b> Mapa de isoyetas normal de precipitación anual entre los años 1981 y 2010, INAMHI.....	19
<b>Figura 3.</b> Distribución espacial de las estaciones utilizadas.....	20
<b>Figura 4.</b> Comportamiento de un semivariograma acotado con una representación de los parámetros básicos. SEMEXP corresponde al semivariograma experimental y MODELO al ajuste de un modelo teórico	25
<b>Figura 5.</b> Variogramas definidos por la librería automap de R.....	26
<b>Figura 6.</b> Interpolaciones realizadas con los métodos kriging en el año 2006.....	35
<b>Figura 7.</b> Desviaciones estándar de las interpolaciones realizadas con los métodos kriging del año 2006.....	37
<b>Figura 8.</b> Variograma generado con kriging ordinario del año 2003.....	42
<b>Figura 9.</b> Interpolación con kriging ordinario e inverso de la distancia del año 2003.....	43
<b>Figura 10.</b> Interpolaciones realizadas con los métodos kriging en el año 2004.....	44
<b>Figura 11.</b> Desviaciones estándar de las interpolaciones realizadas con los métodos kriging del año 2004.....	45
<b>Figura 12.</b> Interpolaciones realizadas con los métodos kriging en el año 2005.....	46
<b>Figura 13.</b> Desviaciones estándar de las interpolaciones realizadas con los métodos kriging del año 2005.....	47
<b>Figura 14.</b> Interpolaciones realizadas con los métodos kriging en el año 2007.....	48
<b>Figura 15.</b> Desviaciones estándar de las interpolaciones realizadas con los métodos kriging del año 2007.....	49
<b>Figura 16.</b> Interpolaciones realizadas con los métodos kriging en el año 2008.....	50



---

<b>Figura 17.</b> Desviaciones estándar de las interpolaciones realizadas con los métodos kriging del año 2008.....	51
---	----

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág
<b>Tabla 1.</b> Información de las estaciones utilizadas en el estudio.....	21
<b>Tabla 2.</b> Correlación entre la precipitación anual y las variables auxiliares.....	31
<b>Tabla 3.</b> Correlación entre las variables auxiliares en cada año de estudio.....	32
<b>Tabla 4.</b> Valores del $\text{adj-R}^2$ de las combinaciones de la regresión lineal múltiple.....	33
<b>Tabla 5.</b> Valores de correlación entre los valores observados y predichos y el RECM de la aplicación de validación cruzada en los años de estudio.....	38





## CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL



Universidad de Cuenca

### CLÁUSULA DE PROPIEDAD INTELECTUAL

*Daniel Fernando Pérez Paredes*, autor/a de la tesis "Comparación de métodos de interpolación geoestadísticos con y sin variables auxiliares para la precipitación anual (2003-2008) en Ecuador", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 17 de octubre de 2016.

Daniel Fernando Pérez Paredes

C.I: 0104565668

## CLÁUSULA DE DERECHO DE AUTOR



Universidad de Cuenca

### CLÁUSULA DE DERECHO DE AUTOR

*Daniel Fernando Pérez Paredes*, autor/a de la tesis "Comparación de métodos de interpolación geoestadísticos con y sin variables auxiliares para la precipitación anual (2003-2008) en Ecuador", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Civil. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autor/a.

Cuenca, 17 de octubre del 2016.



Daniel Fernando Pérez Paredes

C.I: 0104565668



## **DEDICATORIA**

Este trabajo de titulación va dedicado a todas las personas que buscan ir más allá del conocimiento... Sabiduría.

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero agradecer a mi madre, Gloria y a mis hermanas, Verónica y María Gloria, por darme su amor, consejos y precisos regaños; y a mi padre, Vicente, por enseñarme a dar lo mejor de mí sin importar el resultado.

A mis profesores de universidad que con su actitud y palabras, me han guiado para ser el profesional que quiero ser. Un agradecimiento especial a mi directora de tesis, Daniela Ballari, PhD, por su inconmensurable apertura y precisa guía en este último paso universitario. Su actitud ha sido su mejor enseñanza.

A mis amigos Mario, Juan Pablo, Andrea, Carlos, Jacinto, Pablo y Katty por su ayuda anímica y técnica, en la realización de la tesis.

## CONTENIDO

### 1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento del comportamiento del clima es de gran interés en los seres humanos pues permite acceder a una condición de vida adecuada. Uno de los principales componentes del clima es la precipitación. Su comprensión es de vital importancia para el desarrollo de la sociedad ya que permite generar modelos de predicción del escurrimiento, así como datos de entrada en modelos de cuencas o predecir su variación espacial (Abad, 2014; Haining et al., 2010).

La precipitación se mide de manera puntual con la utilización de pluviómetros. Posteriormente, para conocer su distribución espacial en toda el área de estudio es necesario recurrir a un método de interpolación. Entre ellos, los métodos geoestadísticos, como son: el kriging ordinario, el cokriging o el kriging universal; son métodos efectivos a utilizar cuando la variable de interés muestra estructura espacial o autocorrelación espacial. La autocorrelación espacial establece que el valor de la variable de estudio en dos puntos se encuentra en función de la distancia entre los mismos. Así, si los datos usados son cercanos habrá una mayor dependencia espacial mientras que si los datos se alejan la dependencia espacial se debilita. La cuantificación de la dependencia espacial es uno de los pasos fundamentales para realizar la interpolación de la precipitación (Haining et al., 2010). Además, el kriging universal, permite agregar variables auxiliares para mejorar la estimación de la variable de interés (Haining et al., 2010; Holawe y Dutter, 1999; Grimes y Pardo-Iguzquiza, 2010). Los métodos de interpolación no geoestadísticos, en cambio, como son: el método de isoyetas, el método inverso de la distancia, el método aritmético o el método con polígonos de thiessen; no disponen estas particularidades. Son métodos más simples de aplicar, ya que no es necesario determinar la estructura espacial de la variable, pero no proveen el error estándar de la interpolación.

Los estudios geoestadísticos de precipitación generalmente se realizan a partir de los datos provistos por estaciones meteorológicas, ignorando la influencia de variables auxiliares. Sin embargo, la atmósfera y la topografía están íntimamente relacionadas, razón por la cual se deberían utilizar en la estimación del comportamiento de la variable de interés (Pebesma, 2006; Holawe y Dutter, 1999). Debido a lo expuesto, es necesario proveer de casos de estudio a la comunidad profesional sobre la aplicación de los métodos geoestadísticos para la precipitación bajo la influencia de las variables auxiliares. En este contexto, es de vital importancia la validación de los resultados obtenidos para mostrar evidencias de resultados más precisos (Creutin y Obled, 1982; Tabios y Salas, 1985; Abtwe et al., 1993 en Holawe y Dutter, 1999).

Sin embargo, la obtención de óptimos resultados depende de que se considere a la precipitación como homogénea en toda el área de estudio, de la densidad de datos y de la variabilidad espacial y temporal de los patrones de correlación espacial. Hay que reconocer que la precipitación y la densidad de puntos de muestreo pueden tener gran variabilidad, por lo que no existe un único mejor método de interpolación. Sino que esto depende de las características de la precipitación y de la aplicación de los datos (Grimes y Pardo-Iguzquiza, 2010).

El objetivo de este trabajo de titulación es comparar métodos de interpolación geoestadísticos, kriging ordinario (sin variables auxiliares) y kriging universal (con variables auxiliares), para estudiar el comportamiento espacial de la precipitación anual (2003-2008) en el Ecuador continental y estimar así el efecto de utilizar variables auxiliares en la interpolación. Los objetivos específicos son:

- Conocer el comportamiento de la precipitación anual en el Ecuador, con el método de interpolación kriging ordinario.
- Conocer el comportamiento de la precipitación anual en el Ecuador, con el método de interpolación kriging universal y la influencia en su comportamiento de las variables auxiliares: elevación, nubosidad, temperatura del suelo y precipitación de imágenes satelitales.

- Validar la bondad de los métodos de interpolación aplicados mediante validación cruzada.

Para el estudio del comportamiento de la precipitación anual en el Ecuador se ha elegido el periodo entre los años de 2003 al 2008 porque es un período en que se encuentran disponibles variables auxiliares y datos de estaciones meteorológicas completas.

## **2. TRABAJOS RELACIONADOS**

Si bien a nivel internacional los métodos de interpolación geoestadísticos son ampliamente utilizados, a nivel nacional los estudios publicados al respecto son escasos. En el Ecuador, se ha buscado en los repositorios digitales de las universidades categoría A (en julio del 2016), según la categorización de las universidades al año 2015 por parte del Consejo de Evaluación, Acreditación y Aseguramiento de la Calidad de la Educación Superior (CEAACES), sobre información del uso de la geoestadística en cualquier artículo científico, trabajo de investigación o tesis; el resultado es el siguiente:

- La Escuela Politécnica Nacional tiene un total de 35 documentos relacionados con la palabra “geoestadística” y en tres de ellos se aplica en el análisis de la precipitación pero sin usar kriging universal; y un total de 25 documentos relacionados con la palabra “kriging” pero en ninguno de ellos se aplica para el análisis de la precipitación.
- La Escuela Superior Politécnica del Litoral tiene un total de 11 documentos relacionados con la palabra “geoestadística”; y un total de cuatro documentos relacionados con la palabra “kriging”; en ninguno de ellos se aplica para el análisis de la precipitación.
- La Universidad San Francisco de Quito (USFQ) tiene un total de 11 documentos relacionados con la palabra “geoestadística” y un total de 16 documentos relacionados con la palabra “kriging”; en ninguno de ellos se aplica para el análisis de la precipitación.

- En nuestro caso, la Universidad de Cuenca, tiene un total de tres documentos relacionados con la palabra “geoestadística”, en solo uno de ellos se aplica para el análisis de la precipitación usando kriging ordinario y el cokriging, y un total de tres documentos relacionados con la palabra “kriging” y en solo uno de ellos se aplica para el análisis de la precipitación usando el kriging universal.

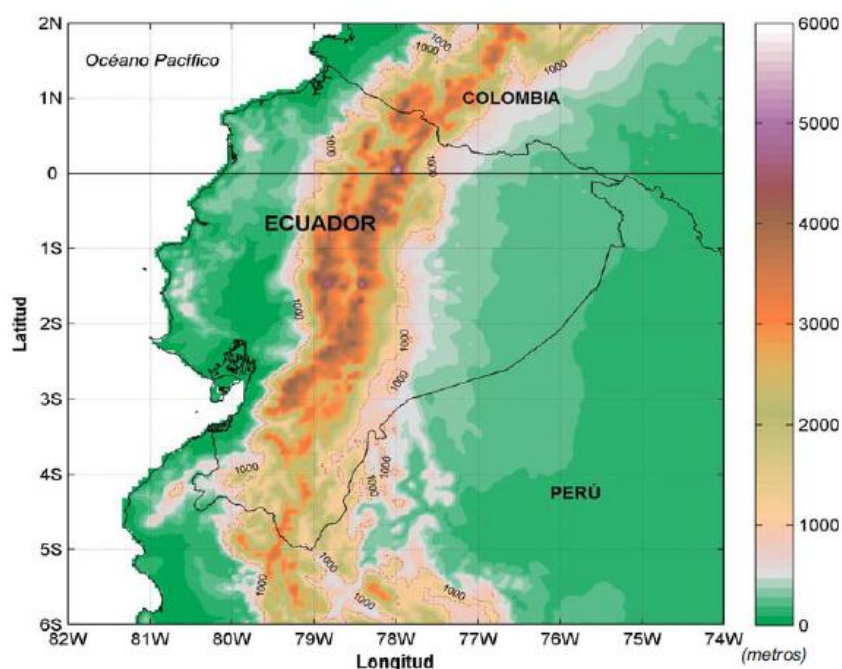
Como trabajos relacionados se puede mencionar al realizado por Buytaert et al. (2005), en la cuenca del río Paute que compara un método no geoestadístico, polígonos de Thiessen, con un método geoestadístico, kriging universal, que concluye que el último es un método más preciso y que el incorporar variables auxiliares mejoran la calidad del análisis de la precipitación. Otro trabajo es el realizado por Grimes y Pardo-Igúzquiza (2010) en Etiopía. Ellos afirman que la herramienta kriging es la más adecuada para entender mejor el comportamiento de la precipitación pues da la apertura de agregar variables auxiliares. También existe el trabajo de Abad (2014) en la cuenca del río Paute que usa cuatro métodos de interpolación, dos no geoestadísticos y dos geoestadísticos, y busca las variables topográficas que mejor se correlacionan con la precipitación. Concluye que a pesar de que los métodos geoestadísticos demandan mayor tiempo son mejores y se recomienda su uso sin olvidar las variables auxiliares que están íntimamente relacionadas con la precipitación.



### 3. MATERIALES

#### 3.1. Descripción de la zona de estudio

La zona de estudio es el Ecuador continental que se encuentra en la costa noroccidental de América del Sur entre los paralelos  $01^{\circ}30' \text{ N}$  y  $03^{\circ}23.5' \text{ S}$  y entre los meridianos  $75^{\circ}12' \text{ O}$  y  $81^{\circ}00' \text{ O}$  (Figura 1). Es atravesado, de norte a sur, por la cordillera de los Andes que lo divide en tres regiones: costa, sierra y oriente (INOCAR, 2012). El clima de Ecuador varía considerablemente a cortas distancias por su ubicación geográfica y por la gran variedad de alturas impuestas por la cordillera; lo que determina las características de la precipitación en cada una de las regiones anteriormente nombradas (Hernández y Zambrano, 2007).

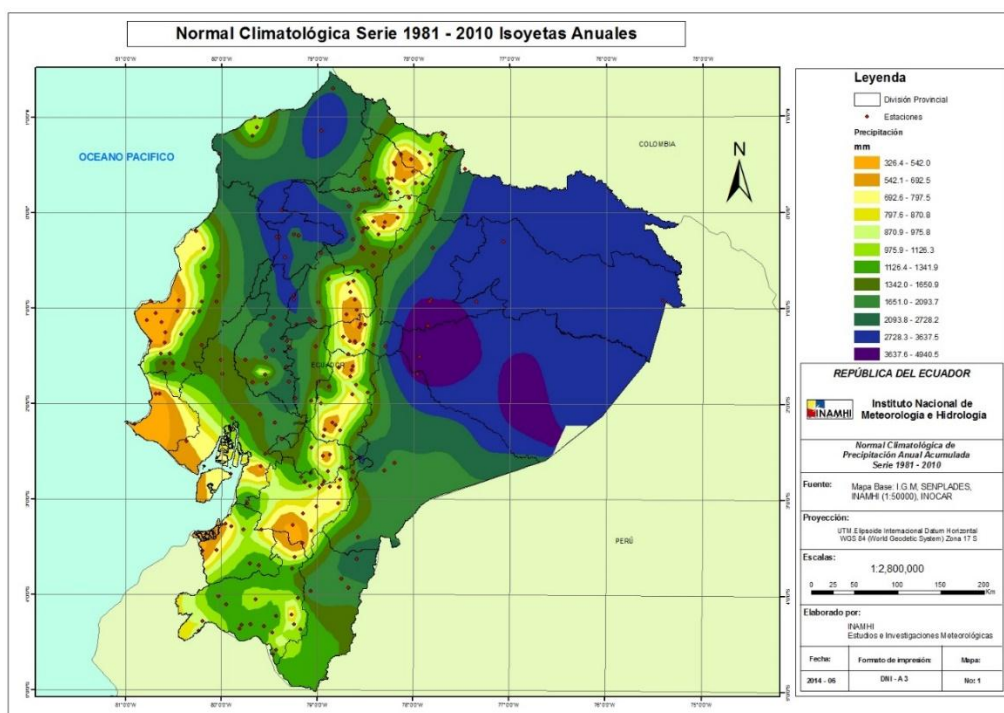


**Figura 1.** Área de estudio con las regiones costa, sierra y oriente delimitadas por la curva de nivel de 1 000 m.s.n.m., según NGDC (2006).

La región costa tiene un régimen de precipitación lluvioso desde diciembre hasta mayo; y luego, empieza un periodo seco hasta noviembre; debido al calentamiento del océano y a la migración sur de la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ, por sus siglas en inglés: Intertropical Convergence Zone); se considera un régimen de precipitación unimodal, debido a su único pico anual (INAMHI, 2014; Hernández y Zambrano, 2007; UNESCO, 2010). El límite de influencia del fenómeno de El Niño está dado por el lado occidental de la cordillera (Rossel et al., 1998). Además, las zonas de Santa Elena, Manta y Portoviejo son las más secas (622 mm/año), en contraste con la zona contigua a Santo Domingo (2 262 mm/año) (UNESCO, 2010).

La región sierra tiene un régimen de precipitación lluvioso principal entre enero y mayo y un período lluvioso secundario entre mediados de septiembre hasta noviembre, con una declinación en diciembre. Luego, comienza un periodo seco entre junio y septiembre. Se considera un régimen de precipitación bimodal por sus dos picos anuales (INAMHI, 2014). La región está influenciada por las masas de aire oceánico y continental (Vuille et al., 2000). Dado que las masas de aire pierden humedad en ambas estribaciones la precipitación anual varía entre 800 mm y 1500 mm (UNESCO, 2010) (Figura 2).

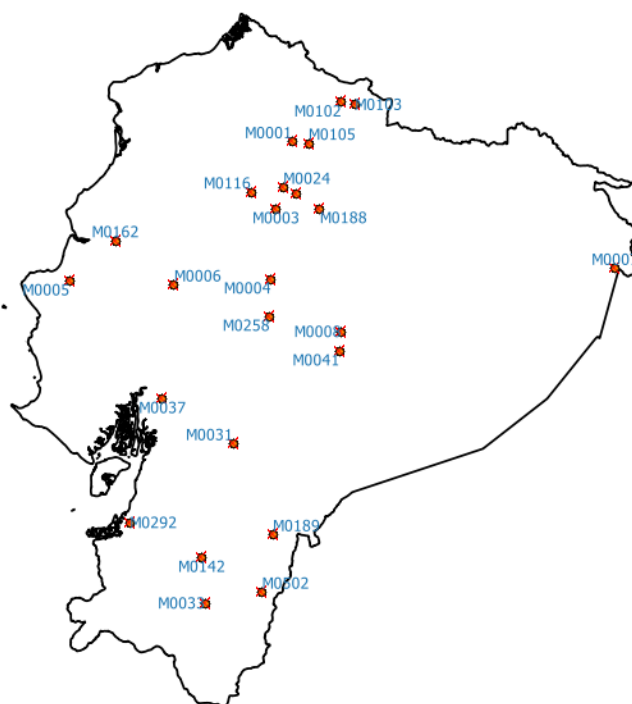
La región oriente tiene un régimen de precipitación todo el año con una inflexión entre junio y septiembre (INAMHI, 2014). En el área de Mera y Puyo, provincia de Pastaza, se da la máxima precipitación del Ecuador que supera los 4500 mm/año (UNESCO, 2010). Se encuentra influenciada por la circulación de masas de aire estacionales que discurren desde los principales centros de alta y baja presión ubicados entre Bolivia y Brasil (Bendix y Lauer, 1992 en UNESCO, 2010).



**Figura 2.** Mapa de isoyetas normal de precipitación anual entre los años 1981 y 2010, INAMHI.

### 3.2. Descripción de la información de las estaciones meteorológicas

Las estaciones meteorológicas utilizadas en este estudio provienen del INAMHI. A pesar que el INAMHI dispone de un amplio número de estaciones, aquí se seleccionaron aquellas que disponían de datos mensuales completos. Un total de 24 estaciones fueron utilizadas a partir de cuyos datos mensuales se calculó la media anual. Las estaciones se encuentran distribuidas en todo el territorio nacional. La figura 3 muestra la distribución de las estaciones utilizadas en este estudio y la tabla 1 el detalle de las mismas.



**Figura 3.** Distribución espacial de las estaciones utilizadas.

**Tabla 1.** Información de las estaciones utilizadas en el estudio.

Código	Nombre	X	Y
M0001	Inguincho	789319.2	10028583
M0002	La Tola	793125.6	9974613
M0003	Izobamba	772701.8	9959435
M0004	Rumipamba-Salcedo	767684.2	9887159
M0005	Portoviejo-UTM	560110.5	9885320
M0006	Pichilingue	667675.4	9881200
M0007	Nuevo Rocafuerte	1122197.9	9898195
M0008	Puyo	840113.9	9833137
M0024	Quito INAMHI-INNAQUITO	780131.5	9981560
M0031	Cañar	728463	9717749
M0033	La Argelia-Loja	699710.8	9553630
M0037	Milagro (Ingenio Valdéz)	655662.3	9764100
M0041	Sangay (P. Santa Ana)	838444.3	9813123
M0102	El Ángel	840210.9	10069334
M0103	San Gabriel	854079.7	10066882
M0105	Otavalo	806121.8	10026927
M0116	Chiriboga	746874.5	9976710
M0142	Saraguro	696167.2	9600576
M0162	Chone-U. Católica	607223.7	9926579
M0188	Papallacta	817847	9959606
M0189	Gualaquiza INAMHI	769358.3	9624070
M0258	Querochaca (UTA)	766444.4	9848748
M0292	Granja Sta. Inés (UTM)	622055.5	9636531
M0502	El Pangui	758210.6	9564913

**Realizado por:** Daniel Pérez P, 2016

**Fuente:** INAMHI

### 3.3. Descripción de las variables auxiliares

**Imágenes satelitales trmm (por sus siglas en inglés):** son imágenes tomadas por el satélite trmm de la Misión de Medición de Lluvias Tropicales. Es un proyecto en conjunto entre la NASA (National Aeronautics and Space Administration) y JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) para estudiar la precipitación en zonas tropicales. Su resolución espacial es de 27 km y la resolución temporal es mensual.

**Nubosidad:** Se obtuvo del satélite MODIS. Se compone, a su vez de varias variables que se detallan a continuación.

- **Cloud fraction (cf):** es el porcentaje de nubosidad por pixel. Las imágenes fueron descargadas desde la página web de la NASA Earth Observations (NEO), son imágenes mensuales con una resolución de  $0.1^\circ$  (aproximadamente 11km), pero se resampearon a 10 km con el método bilineal.
- **Cloud water content (cwc):** cantidad de agua que tiene las nubes por pixel. Las imágenes fueron descargadas desde la página web de la NASA Earth Observations (NEO), son imágenes mensuales con una resolución de  $0.1^\circ$  (aproximadamente 11km) en  $\text{g/m}^2$ , pero se resampearon a 10 km con el método bilineal.
- **Cloud top pressure (ctp):** es la presión atmosférica a la máxima altura de la nube. Se descargaron del servidor <ftp://ladsweb.nascom.nasa.gov/>. La resolución espacial es de  $1^\circ$  (111km), pero se resampearon a 10 km con el método bilineal.
- **Cloud top temperature (ctt):** es la temperatura a la máxima altura de la nube. Se descargaron del servidor <ftp://ladsweb.nascom.nasa.gov/>. La resolución espacial es de  $1^\circ$  (111km), pero se resampearon a 10 km con el método bilineal.

**Temperatura del suelo (ts):** estas imágenes satelitales fueron obtenidas del sistema de datos en línea Giovanni, desarrollado y mantenido por NASA GES DISC. Estas imágenes anuales del día y la noche, con una resolución de  $0.05^\circ$  (5km) en Kelvins, pero se resampearon a 10 km con método bilineal.

**Modelo digital de elevaciones (dem, por siglas en inglés):** estas imágenes fueron obtenidas por el trabajo en conjunto del METI (Ministry of Economy, Trade, and Industry) de Japón y la NASA (National Aeronautics and Space Administration) que lanzaron ASTER GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model). La resolución espacial es de 30m, pero se resamplio a 10k con método bilineal.

## 4. MÉTODOS

El método se compone de tres etapas:

- Primero, se realiza la **interpolación de precipitación anual sin variables auxiliares**. Esto se realiza con **kriging ordinario (4.1)** cuando se esté en presencia de autocorrelación espacial, o con **método inverso de la distancia (IDW) (4.2)** cuando no se esté en presencia de autocorrelación espacial.
- Segundo, se realiza la **interpolación con las variables auxiliares** (trmm, nubosidad, temperatura del suelo y DEM). Para esto se utiliza **kriging universal (4.3)**. Solo se aplica para los años en los que se evidenció autocorrelación espacial. Para seleccionar las variables auxiliares adecuadas se hacen análisis de **regresión lineal múltiple (4.3.1)** entre las estaciones meteorológicas y los valores correspondientes para cada variable secundaria.
- Finalmente, se aplica **validación cruzada (4.4)** para evaluar la efectividad de la interpolación de los métodos sin y con variables auxiliares.

### 4.1. Interpolación sin variables auxiliares: Kriging Ordinario

Los métodos de interpolación kriging minimizan el error cuadrático medio de predicción (Giraldo, 2002). Suponga que las mediciones de la variable de interés,  $Z$ , se toman en los puntos  $x_{i-n}$  de la zona de estudio, o sea  $Z(x_i)$ ; y se desea predecir el valor en un punto sin observación  $Z(x_0)$ . En esta circunstancia, el método kriging ordinario predice el valor de la variable con una combinación lineal de los  $n$  puntos de observaciones, así (Giraldo, 2002):

$$Z(x_0) = \lambda_1 Z(x_1) + \lambda_2 Z(x_2) + \lambda_3 Z(x_3) + \cdots + \lambda_n Z(x_n) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i)$$

En donde los  $\lambda_1$  son los pesos de los valores originales. Estos pesos se calculan en función de la distancia entre los puntos muestreados y el punto donde se va a hacer la predicción (Giraldo, 2002).

#### 4.1.1. Variograma

La interpolación kriging requiere del conocimiento de la estructura de autocorrelación para cualquier distancia dentro del área de estudio. Para esto, se realiza un ajuste de modelos que generalicen lo observado en el semivariograma experimental a cualquier distancia. La semivarianza es estimada a través del semivariograma experimental, que se calcula mediante (Giraldo, 2002):

$$\bar{\gamma}(h) = \frac{\sum (Z(x+h) - Z(x))^2}{2n}$$

$Z(x)$ , es el valor de la variable en un sitio  $x$

$Z(x+h)$ , es el valor muestral separado del anterior por una distancia  $h$

$n$ , es el número de parejas que se encuentran separadas dicha distancia

La función de semivarianza se calcula para varias distancias  $h$ . Debido a la irregularidad de las distancias entre los sitios del muestreo, se toman intervalos de distancia  $\{[0, h], (h, 2h], (2h, 3h], \dots\}$  y el semivariograma experimental corresponde a una distancia promedio entre parejas de sitios dentro de cada intervalo y no a una distancia  $h$  específica (Giraldo, 2002).

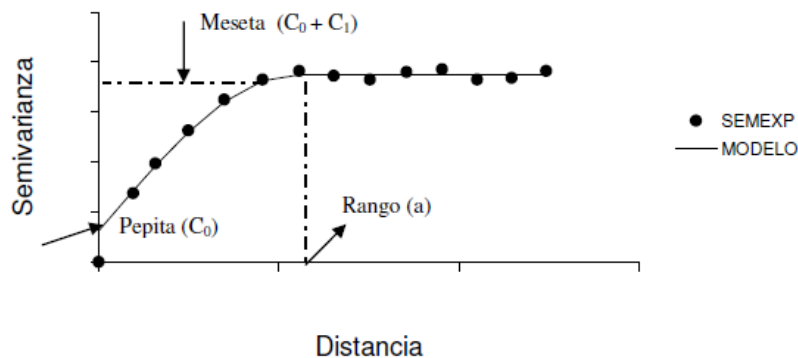
Los modelos de cada variograma tienen tres parámetros que son:

- **Efecto Pepita ( $C_0$ ):** es una medida de la variabilidad de la variable de estudio a distancias pequeñas. Se da por errores de medición en la variable o a la escala de la misma (Giraldo, 2002; Holawe y Duttler, 1999). Cuando no se detecta autocorrelación espacial en los datos, el variograma solo contiene efecto pepita puro. Esto se observa como una función horizontal. En estos casos, es que se decidió utilizar el método



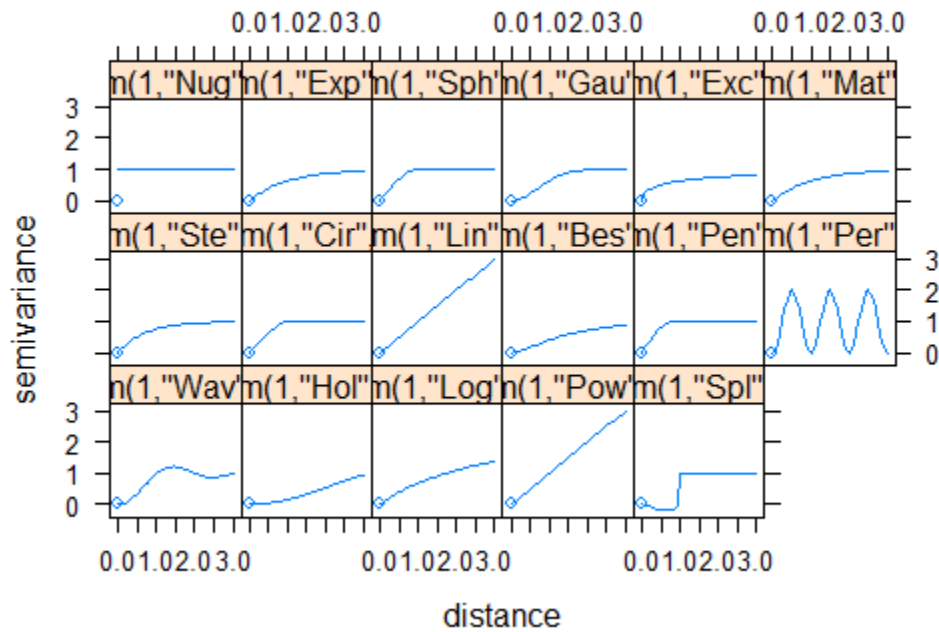
IDW (sección 4.2) ya que no se justifica utilizar kriging por la ausencia de autocorrelación espacial.

- **Meseta ( $C_0 + C_1$ ):** es el límite superior del semivariograma que indica que ya no hay correlación entre las observaciones. Puede ser finita o infinita. Los semivariogramas que tiene meseta finita cumplen con la hipótesis de estacionariedad fuerte. La pepita no debe representar más del 50% de la meseta (Giraldo, 2002; Holawe y Duttler, 1999).
- **Rango:** es la distancia a partir de la cual dos observaciones son independientes (Giraldo, 2002).



**Figura 4.** Comportamiento de un semivariograma acotado con una representación de los parámetros básicos. SEMEXP corresponde al semivariograma experimental y MODELO al ajuste de un modelo teórico (Giraldo, 2002).

Los modelos para el ajuste del variograma experimental pueden ser de diferentes tipos: esférico, exponencial, logarítmico, etc. Para este análisis se han utilizado los variogramas: exponencial (Exp), esférico (Shp) y gaussiano (Gau); incluidos en la librería automap del software R. Automap selecciona el modelo (Exp, Shp o Gau) que mejor ajuste el variograma experimental. Estos modelos son:



**Figura 5.** Variogramas definidos por la librería automap de R.

#### 4.2. Interpolación sin variables auxiliares: Inverso de la Distancia

Este método asigna pesos a los datos de puntos conocidos, en función inversa de la distancia del punto de valor desconocido. Este es un método de interpolación simple que no tiene en cuenta la autocorrelación espacial. Su fórmula es (Hengl, 2009):

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(x_0) * Z(x_i)$$

$Z(x_0)$ , es el valor de la variable en un sitio cualquiera

$Z(x_i)$ , es el valor de la variable en un sitio conocido

$\lambda_i$ , es el peso asignado para el punto de valor desconocido

$$\lambda_i(x_0) = \frac{\frac{1}{d^{\beta}(S_0, S_1)}}{\sum_{i=0}^n \frac{1}{d^{\beta}(S_0, S_1)}}; \beta > 1$$

$d^{\beta}(S_0, S_1)$ , es la distancia desde el nuevo punto a un punto conocido

---

$\beta$ , es el coeficiente usado para ajustar los pesos

### 4.3. Interpolación con variables auxiliares: Kriging Universal

En el kriging ordinario se asume que la variable regionalizada es estacionaria pero en muchos casos la variable no satisface estas condiciones, como sucede con la variable precipitación que se caracteriza por exhibir una tendencia. Para tratar este tipo de variables se descompone la variable  $Z(x)$  como la suma de la tendencia, tratada como una función determinística más una componente estocástica estacionaria de media cero. Asuma que (Giraldo, 2002):

$$Z(x) = m(x) + \epsilon(x)$$

$$\text{con } E(\epsilon(x)) = 0, V(\epsilon(x)) = \sigma^2 \text{ y por consiguiente } E(Z(x)) = m(x)$$

La tendencia es:

$$m(x) = \sum_{i=1}^p a_i f_i(x)$$

Donde las funciones  $f_i(x)$  son conocidas y  $p$  es el número de términos empleados para ajustar  $m(x)$ . Así, el predictor kriging universal es:

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i)$$

#### 4.3.1. Regresión Lineal Múltiple

La regresión lineal múltiple analizará el comportamiento entre la variable precipitación y las variables auxiliares. Se utilizarán diferentes combinaciones de variables auxiliares. Para conocer cuál de estas combinaciones son satisfactorias, se utilizará el coeficiente de determinación R cuadrado ajustado ( $\text{adj-R}^2$ ). Su valor está en un rango entre 0 y 1. Este coeficiente permite conocer el porcentaje de los datos que están explicados por el modelo lineal

ajustado, siendo el valor 1 un modelo perfectamente ajustado, o sea los residuales valen 0 (Faraway, 2014).

Para ello, primero se analiza la correlación entre la precipitación anual y cada una de las variables auxiliares. Luego la regresión lineal múltiple se realiza con las variables auxiliares de mayor coeficiente de correlación.

#### **4.4. Validación Cruzada**

La validación cruzada se utiliza para evaluar la predicción realizada con los métodos de kriging: ordinario y universal. Consiste en excluir de la interpolación la observación de uno de los  $n$  puntos de muestreo y con las  $n - 1$  observaciones restantes y el modelo de variograma escogido, predecir el valor de la variable en el lugar del punto excluido (Giraldo, 2002). Este procedimiento se repite  $n$  veces con la intención de disponer de  $n$  valores observados y de  $n$  valores interpolados. A partir de los residuos se calculan medidas de desempeño, como es el caso del error medio cuadrático y correlación entre observación y predicción.

#### **4.5. Implementación en R**

La implementación se realizó en R. Las librerías utilizadas son `rgdal`, `sp`, `reshape`, `gstat`, `automap`, `raster` y `ncdf4`. A continuación se describe brevemente el procedimiento realizado:

##### **Precipitación anual**

- Seleccionar los años de estudio de la información proporcionada por el INAMHI e identificar las estaciones que tengan todos los datos completos.
- Calcular el promedio anual de cada una de las estaciones seleccionadas.
- Resultado: 24 estaciones con valores de precipitación media anual para los años 2003 a 2008.

## Kriging Ordinario

- Crear una grilla vacía de 10 km con límite igual al Ecuador.
- Interpolar cada año con la función “autokrige” de la librería automap. Los modelos de variograma ajustado se limitaron a tres modelos: exponencial (Exp), esférico (Sph) y gaussiano (Gau).
- Explorar los variogramas ajustados para analizar la autocorrelación espacial.
- Resultado: 5 imágenes raster con precipitación anual interpolada para los años 2004 a 2008. 5 imágenes raster con error estándar de la interpolación para los años 2004 a 2008.

## IDW

- Para el año 2003, no se identificó autocorrelación espacial en el variograma ajustado por automap (Puro efecto pepita). Por lo cual, para este año se aplicó IDW con la función “krige” de la librería Gstat.
- Resultado: 1 imagen raster con precipitación anual interpolada para el año 2003.

## Variables auxiliares

- Cargar en R las imágenes descargadas de un año. Agrupar imágenes en un “raster brick” y cortarlas (crop) con el límite de Ecuador continental.
- Reproyectar a coordenadas UTM zona 17.
- Resamplear tamaño de grilla a 10 km con método bilineal.
- Calcular el promedio anual de cada una de las variables auxiliares a partir de las imágenes satelitales descargadas.
- Resultado: 6 imágenes raster con los promedios anuales de las variables auxiliares.

## Regresión lineal múltiple

- Extraer información de variables auxiliares para las coordenadas de las 24 estaciones. Para esto se utiliza la función “extract” de la librería raster.

- Realizar correlación entre la precipitación anual y cada una de las variables auxiliares. Seleccionar variables auxiliares con mayor coeficiente de correlación.
- Realizar regresión lineal múltiple con precipitación anual y variables auxiliares seleccionadas del paso anterior. Seleccionar la combinación de variables auxiliares con mayor  $R^2$  ajustado.
- Resultado: variables auxiliares mejor correlacionadas con la precipitación anual y combinaciones de variables auxiliares que producen mayor  $R^2$  ajustado en la regresión lineal múltiple.

### **Kriging Universal**

- Crear una grilla vacía de 10 km con límite igual al Ecuador.
- Interpoliar cada año con la función “autokrige” de la librería automap con las combinaciones de variables seleccionadas del paso anterior. Los modelos de variograma ajustado se limitaron a tres modelos: exponencial (Exp), esférico (Sph) y gaussiano (Gau).
- Resultado: 5 imágenes raster con precipitación anual interpolada para los años 2004 a 2008. 5 imágenes raster con error estándar de la interpolación para los años 2004 a 2008 (para el año 2003 no se realizó kriging universal por no tener autocorrelación espacial).

### **Validación cruzada**

- Crear una grilla vacía de 10 km con límite igual al Ecuador.
- Aplicar validación cruzada para cada año con la función “autoKrige.cv” de la librería automap con las combinaciones de las variables seleccionadas.
- Resultado: seis interpolaciones aplicando el kriging ordinario y cinco interpolaciones aplicando el kriging universal. De cada interpolación usando el comando “summary()” se han obtenido los errores de la interpolación.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1. Interpolación Kriging Universal

#### 5.1.1. Correlación

La tabla 2 muestra la correlación entre la precipitación anual y las variables auxiliares para todos los años de estudio. El año 2003 se ha excluido por la imposibilidad de aplicar kriging universal al no presentar autocorrelación espacial. En la tabla se encuentran las 7 variables auxiliares descritas en materiales, más las coordenadas X e Y. Esto se debe a la exploración de la variabilidad de la precipitación en sentido longitudinal y latitudinal.

La variable secundaria trmm tiene una muy buena correlación con la precipitación anual en todos los años, con un valor mayor a 0.79 y la variable auxiliar cwc tiene una correlación aceptable con un valor mayor a 0.57. El resto de variables auxiliares no se encuentran correlacionadas con la precipitación anual en ningún año. A pesar que las coordenadas X e Y muestran correlaciones de medias a bajas, se optó por incluirlas en los pasos posteriores ya que el método de kriging universal asume una tendencia que es modelada en función de las coordenadas (Hengl, 2009). De los resultados obtenidos se seleccionaron las variables auxiliares trmm, cwc, X e Y para continuar con la regresión lineal múltiple y la interpolación.

**Tabla 2.** Correlación entre la precipitación anual y las variables auxiliares.

	<b>trmm</b>	<b>cf</b>	<b>cwc</b>	<b>ctp</b>	<b>ctt</b>	<b>ts</b>	<b>dem</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>
<b>2004</b>	<b>0.7983</b>	0.2991	<b>0.6014</b>	-0.2632	-0.2814	-0.3579	-0.2767	0.3932	-0.019
<b>2005</b>	<b>0.8016</b>	0.2346	<b>0.6875</b>	-0.2665	-0.2995	-0.4058	-0.2713	0.4267	0.0218
<b>2006</b>	<b>0.9169</b>	0.2791	<b>0.6447</b>	-0.241	-0.2633	-0.3848	-0.348	0.4744	0.0298
<b>2007</b>	<b>0.8721</b>	0.2565	<b>0.6783</b>	-0.287	-0.3169	-0.3256	-0.2832	0.4816	-0.0043
<b>2008</b>	<b>0.8091</b>	0.31	<b>0.5799</b>	-0.1656	-0.1996	-0.1471	-0.3307	0.3514	0.0366

**Realizado por:** Daniel Pérez P, 2016

En la tabla 3 se observa la correlación entre las variables auxiliares. En particular trmm y cwc están correlacionadas con un valor mayor a 0.70. A pesar

de ser un coeficiente de correlación elevado, se ha optado por mantenerlas como variables independientes con el fin de explorar su aporte individual y en conjunto en la interpolación de kriging universal.

**Tabla 3.** Correlación entre las variables auxiliares en cada año de estudio.

	trmm	cf	cwc	ctp	ctt	ts	dem
<b>2004</b>							
trmm	1	0.2302	<b>0.784</b>	-0.4416	-0.4779	-0.2775	-0.19
cf		1	0.3211	0.4711	0.4269	-0.5197	<b>-0.7077</b>
cwc			1	-0.4855	-0.4908	-0.0355	0.0053
ctp				1	<b>0.9815</b>	-0.5236	<b>-0.7083</b>
ctt					1	-0.4253	<b>-0.6339</b>
ts						1	<b>0.8155</b>
dem							1
<b>2005</b>							
trmm	1	0.1827	<b>0.8663</b>	-0.4407	-0.4898	-0.3402	-0.1814
cf		1	0.124	0.533	0.4714	-0.7317	<b>-0.7599</b>
cwc			1	-0.5193	-0.5252	-0.1371	0.0727
ctp				1	<b>0.9821</b>	-0.5412	<b>-0.7201</b>
ctt					1	-0.4451	<b>-0.6458</b>
ts						1	<b>0.8768</b>
dem							1
<b>2006</b>							
trmm	1	0.2094	<b>0.7063</b>	-0.3876	-0.4247	-0.3276	-0.2267
cf		1	0.2828	0.4923	0.4512	-0.5482	<b>-0.7052</b>
cwc			1	-0.3946	-0.3459	-0.002	0.0238
ctp				1	<b>0.9818</b>	-0.473	<b>-0.7354</b>
ctt					1	-0.3948	<b>-0.6703</b>
ts						1	<b>0.6941</b>
dem							1
<b>2007</b>							
trmm	1	0.0655	<b>0.7207</b>	-0.5216	-0.5761	-0.2536	-0.0919
cf		1	0.3471	0.5073	0.4889	-0.5563	-0.6637
cwc			1	-0.3333	-0.3063	-0.091	-0.038
ctp				1	<b>0.9824</b>	-0.4985	-0.7387
ctt					1	-0.4071	-0.6719
ts						1	<b>0.7632</b>
dem							1
<b>2008</b>							
trmm	1	0.2412	<b>0.8292</b>	-0.3164	-0.3702	-0.1809	-0.2602
cf		1	0.3627	0.472	0.4041	-0.5294	<b>-0.6034</b>
cwc			1	-0.3561	-0.4006	-0.2207	-0.08
ctp				1	<b>0.9806</b>	-0.3172	<b>-0.7623</b>
ctt					1	-0.2514	<b>-0.6881</b>
ts						1	0.4417
dem							1

Realizado por: Daniel Pérez P, 2016



### 5.1.2. Regresión Lineal Múltiple

Para la regresión lineal múltiple y la posterior interpolación se utilizaron modelos de variables dependientes, considerando que la variable independiente es la precipitación provista por las estaciones meteorológicas. La nomenclatura corresponde a la utilizada en la función `lm()` de regresión lineal de R. Los modelos de variables dependientes son los siguientes:

- `~cwc+X+Y`
- `~trmm+X+Y`
- `~cwc+trmm+X+Y`

En la tabla 4 se puede observar que el mejor ajuste de regresión lineal múltiple proviene de la combinación de las variables auxiliares `~trmm+X+Y`, pues su coeficiente de determinación ajustado es el mayor entre las tres combinaciones en todos los años de estudio. El  $\text{adj-R}^2$  presenta una variabilidad considerable en los años estudiados con un mínimo de 0.58 y un máximo de 0.9. El ajuste con las variables auxiliares `~cwc+trmm+X+Y` son valores ligeramente inferiores a `~trmm+X+Y` (entre 0.56 y 0.9). La combinación `~cwc+X+Y` provee un  $\text{adj-R}^2$  muy bajo, aunque la correlación con dicha variable fue aceptable. El mejor año ajustado es el año 2006 para las combinaciones `~trmm+X+Y` y `~cwc+trmm+X+Y`.

**Tabla 4.** Valores del  $\text{adj-R}^2$  de las combinaciones de la regresión lineal múltiple.

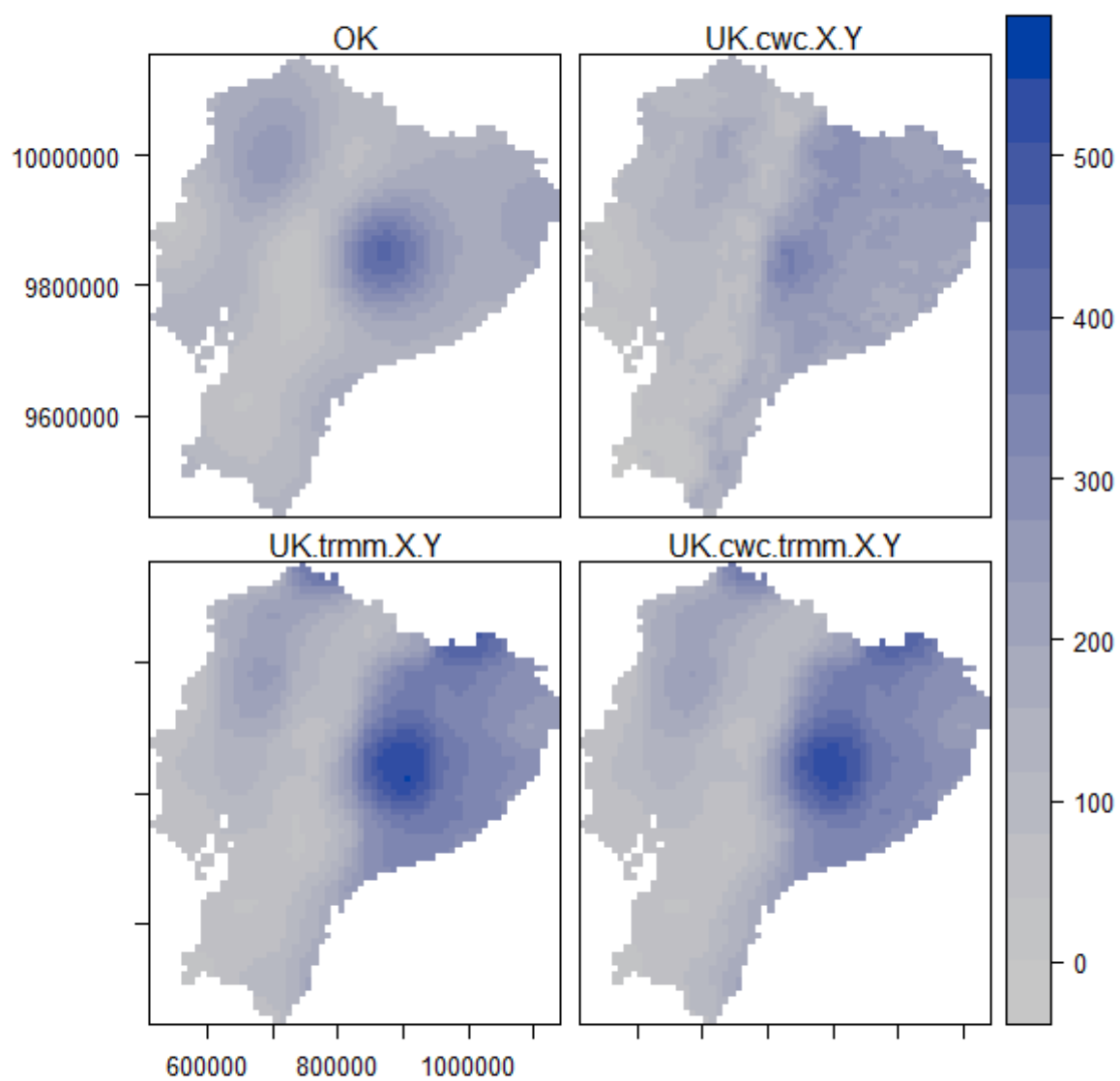
	2004	2005	2006	2007	2008
<code>~ cwc + X + Y</code>	0.3177	0.4306	0.3718	0.4501	0.1857
<code>~ trmm + X + Y</code>	<b>0.5819</b>	<b>0.6184</b>	<b>0.9062</b>	<b>0.8359</b>	<b>0.6061</b>
<code>~ cwc + trmm + X + Y</code>	0.561	0.5987	0.9029	0.8293	0.6104

**Realizado por:** Daniel Pérez P, 2016

### 5.1.3. Interpolación sin y con variables auxiliares

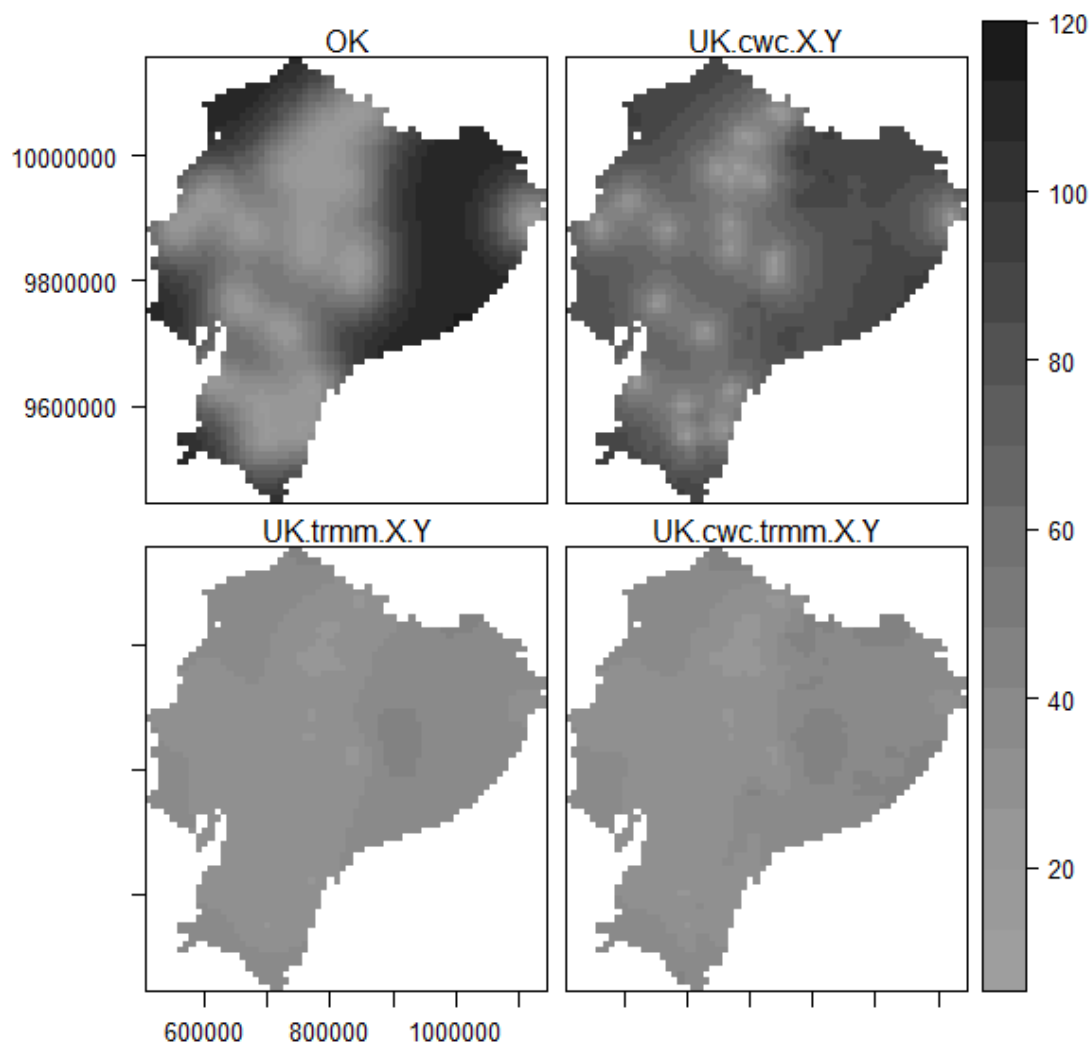
En esta sección se muestran los resultados de las interpolaciones sin variables auxiliares (Kriging Ordinario - OK) y con variables auxiliares (Kriging Universal - UK.cw.cX.Y, UK.trmm.X.Y y UK.cwc.trmm.XY). A modo de ejemplo se incluyen los resultados del año 2006 puesto que es el año en que, de acuerdo a la regresión lineal múltiple, se esperan los mejores resultados. Los mapas de los demás años se encuentran en Anexos.

En la figura 6 se observa que con las tres interpolaciones con variables auxiliares, la precipitación muestra un patrón de variabilidad heredado de la variable secundaria (Hengl, 2009). En el caso de  $\sim\text{trmm}+X+Y$  y  $\sim\text{cwc}+\text{trmm}+X+Y$ , el patrón espacial, en general, se corresponde con el mapa OK sin variables auxiliares. Sin embargo, la combinación  $\sim\text{cwc}+X+Y$ , provee un patrón de precipitación menos intenso y más disperso que el resto de interpolaciones. Esto es especialmente visible en la Amazonia. Es de destacar, que las variables auxiliares permiten representar la variabilidad de la precipitación en la Amazonia, donde dado la escasez de estaciones meteorológicas el método OK muestra una variabilidad homogénea. La efectividad de cada interpolación se comprobará en la sección de validación cruzada.



**Figura 6.** Interpolaciones realizadas con los métodos kriging en el año 2006.

La figura 7 muestra la desviación estándar de las cuatro interpolaciones. Se evidencia que las combinaciones  $\sim \text{trmm} + X + Y$  y  $\sim \text{cwc} + \text{trmm} + X + Y$  producen una desviación estándar homogénea en todo el país y mucho inferior a OK y a  $\sim \text{cwc} + X + Y$ . Al compararse con la combinación  $\sim \text{cwc} + X + Y$ , es que se puede atribuir tal reducción a la variable trmm. En el caso de OK, se evidencian valores bajos de desviación estándar de la interpolación en las proximidades de las estaciones meteorológicas, aumentando con la distancia a las estaciones. Además los valores más elevados de desviación estándar se presentan en la Amazonia, donde se localizan escasas estaciones. En la Sierra y Costa, donde se localiza el mayor número de estaciones utilizadas, la desviación estándar de la interpolación es menor.



**Figura 7.** Desviaciones estándar de las interpolaciones realizadas con los métodos kriging del año 2006.

La interpolación para el año 2003 con el método IDW se incluye en Anexos.

## 5.2. Validación Cruzada

La tabla muestra los resultados de validación cruzada mediante la correlación entre los valores observados ( $cor\_obspred$ ) y las predicciones de interpolación

y la raíz del error medio cuadrático de los residuos (RECM). Para el año 2003 se muestran solo los resultados de la interpolación con el método IDW. Para los demás años se muestran los valores de las 4 interpolaciones.

La mejor  $cor\_obspred$  (entre 0.7 y 0.95) y el menor RECM (entre 27.7 y 69.9) se obtiene usando kriging universal con la combinación  $\sim trmm+X+Y$ , tal y como se esperaba de los resultados de la regresión lineal múltiple (tabla 4). Esta tendencia se mantiene para todos los años de estudio. Los resultados para la combinación  $\sim cwc+trmm+X+Y$  es muy cercana, pero inferior a  $\sim trmm+X+Y$  ( $cor\_obspred$  entre 0.72 y 0.94 y RECM entre 30.4 y 71.64). Finalmente,  $\sim cwc+X+Y$  se encuentra muy por debajo con correlación entre 0.54 y 0.84 y error medio entre 47.7 y 87.2.

Al comparar UK con OK, se observa que en las dos combinaciones en las que participa  $trmm$ , la correlación aumenta y el error disminuye en todos los años. No sucede lo mismo para la combinación  $\sim cwc+X+Y$  que muestra solo mejorías en los años 2004 y 2005. Por ello se puede destacar que  $trmm$  proporciona una mejoría en la interpolación en todos los años analizados, mientras que en el caso de  $cwc$  la mejoría es variable.

**Tabla 5.** Valores de correlación entre los valores observados y predichos y el RECM de la aplicación de validación cruzada en los años de estudio.

	2003	2004	2005	2006	2007	2008
<b>cor_obspred</b>						
<b>KO (IDW)</b>	0.4460	0.5347	0.5880	0.8711	0.7782	0.6010
$\sim cwc + X + Y$		0.5406	0.5584	0.8408	0.7475	0.5498
$\sim trmm + X + Y$		<b>0.7352</b>	<b>0.7536</b>	<b>0.9494</b>	<b>0.9020</b>	<b>0.7487</b>
$\sim cwc + trmm + X + Y$		0.7206	0.7402	0.9404	0.8938	0.7486
<b>RECM</b>						
<b>KO (IDW)</b>	117.2800	88.3800	85.4300	43.3100	62.1300	68.4900
$\sim cwc + X + Y$		87.1800	86.7500	47.7000	63.7800	69.5500
$\sim trmm + X + Y$		<b>69.9900</b>	<b>68.2400</b>	<b>27.6800</b>	<b>41.5000</b>	<b>55.4200</b>
$\sim cwc + trmm + X + Y$		71.6100	69.7800	30.4400	43.2400	55.5100

Realizado por: Daniel Pérez P, 2016

## 6. CONCLUSIONES

Este trabajo comparó los métodos de interpolación geoestadísticos, kriging ordinario (sin variables auxiliares) y kriging universal (con variables auxiliares), para analizar el comportamiento espacial de la precipitación anual (2003-2008) en el Ecuador y estimar el efecto de variables auxiliares en la interpolación.

Se ha concluido que el mejor método de interpolación es el kriging universal con una combinación de variables auxiliares  $\sim \text{trmm} + X + Y$ . Si bien la combinación  $\sim \text{cwc} + \text{trmm} + X + Y$  está muy cercana al resultado anterior esta cercanía se explicada en su gran mayoría por la variable trmm, que tiene una alta correlación con la precipitación anual de todos los años. Además, el kriging universal con la variable trmm provee una desviación estándar de la interpolación menor y homogénea en todo el país. Finalmente, las variables auxiliares permiten representar la variabilidad de la precipitación en la Amazonia, donde las estaciones meteorológicas son escasas.

Como limitaciones principales en el trabajo se puede mencionar: la escasa densidad de estaciones utilizadas, la necesidad de evaluar parámetros derivados de la altitud como orientación y pendiente y la necesidad de comprobar la efectividad de las variables auxiliares a escala mensual.

Como futuros estudios espero se agreguen otras variables auxiliares, como: la humedad, la radiación solar o la temperatura ambiente. También es necesario explorar la influencia de las variables auxiliares en diferentes escalas temporales, como por ejemplo por estacionalidades, mensual y diaria.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abad Encalada, I. O. (2014). Tesis. Recuperado a partir de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/19857>.
- Buytaert, W., Celleri, R., Willems, P., Bièvre, B. D., & Wyseure, G. (2006). Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. *Journal of Hydrology*, 329, 413–421.
- Creutin, J. D., & Obled, C. (1982). Objective analyses and mapping techniques for rainfall fields: an objective comparison. *Waterresourcesresearch*, 18(2), 413-431.
- Faraway, J. J. (2014). *Linear models with R*. CRC Press.
- Giraldo, R. (2002). Introducción a la geoestadística: Teoría y aplicación. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Grimes, D. I. F., & Pardo-Iguzquiza, E. (2010). Geostatistical Analysis of Rainfall. *Geographical Analysis*, 42, 136–160.
- Haining, R. P., Kerry, R., & Oliver, M. A. (2010). Geography, spatial data analysis, and geostatistics: An overview. *Geographical Analysis*, 42(1), 7–31.
- Hengl, T. (2009). *A practical guide to geostatistical mapping* (Vol. 52). Hengl.
- Hernández, F., & Zambrano, E. (2007). Inicio, duración y término de la estación lluviosa en cinco localidades de la costa ecuatoriana.
- Holawe, F., & Dutter, R. (1999). Geostatistical study of precipitation series in Austria: Time and space. *Journal of Hydrology*, 219(1-2), 70–82.
- INAMHI (2014). Análisis de las condiciones climáticas registradas en el Ecuador continental en el año 2013 y su impacto en el sector agrícola. Juan Palacios.



---

INOCAR (2012). Derrotero de las costas ecuatorianas.

Pebesma, E. J. (2006). The role of external variables and GIS databases in geostatistical analysis. *Transactions in GIS*, 10(4), 615–632.

Rossel, F., Mejía, R., Ontaneda, G., Pombosa, R., Roura, J., Calvez, R., & Cadier, E. (1998). Régionalisation de l'influence du El Niño sur les précipitations de l'Equateur. *Bulletin de l'Institut français d'études andines*, 27(3).

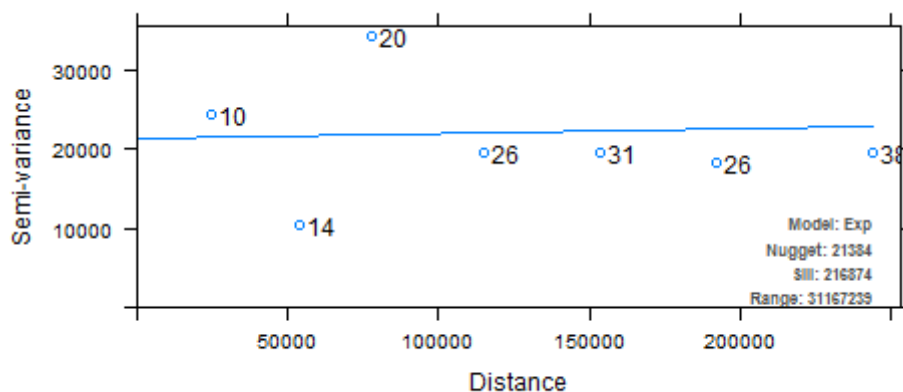
UNESCO (2010). Atlas Pluviométrico del Ecuador. Jonathan Cedeño, María Concepción Donoso. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N°21.

Vuille, M., Bradley, R. S., & Keimig, F. (2000). Climate variability in the Andes of Ecuador and its relation to tropical Pacific and Atlantic sea surface temperature anomalies. *Journal of Climate*, 13(14), 2520-2535.

## 8. ANEXOS

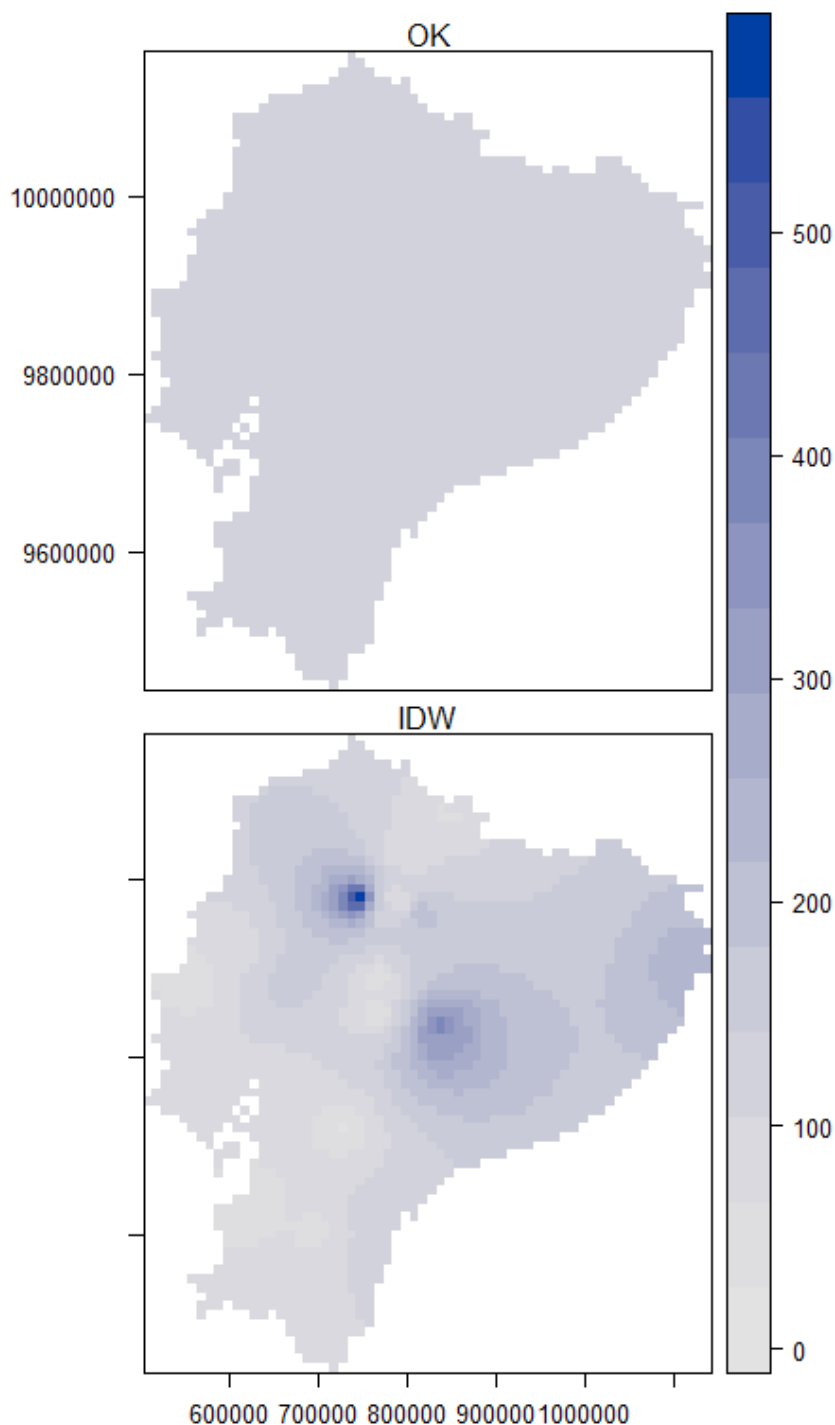
### 8.1 Anexo A

#### Interpolación del año 2003.



**Figura 8.** Variograma generado con kriging ordinario del año 2003.

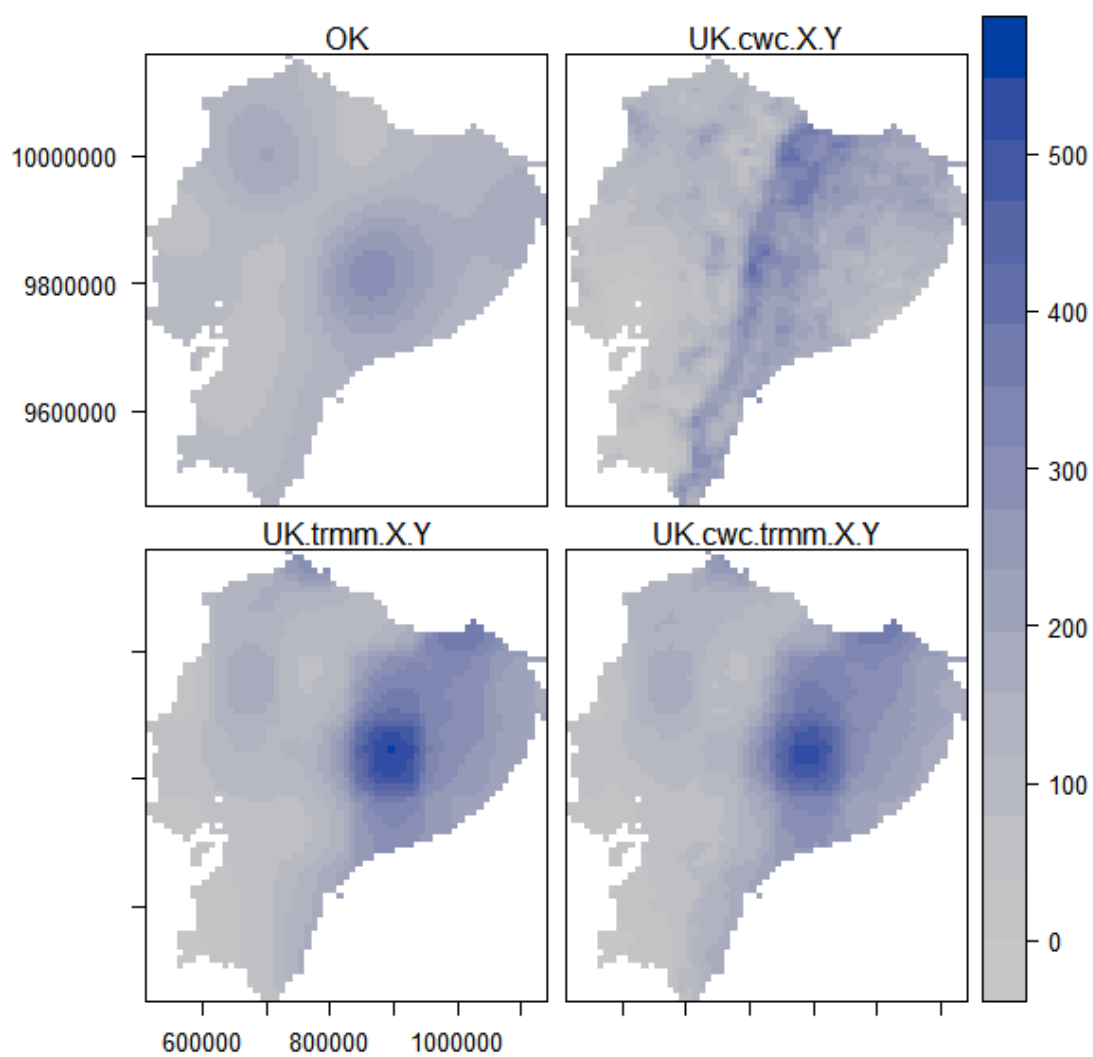
En la figura 8 se observa que el variograma de los datos de precipitación del año 2003 tiene un efecto de pepita puro, casi horizontal u horizontal, que es el efecto producto de que la semivarianza de la distancia de los pares de puntos de las estaciones no explican una autocorrelación. Por esta razón se ha decidido usar para este año el método de interpolación, no geoestadístico, Inverso de la Distancia (IDW, por sus siglas en inglés). Además, se ha concluido que no se aplicará para este año el método kriging universal debido a que también utiliza el variograma para calcular la predicción, por lo que no aportará buenos resultados.



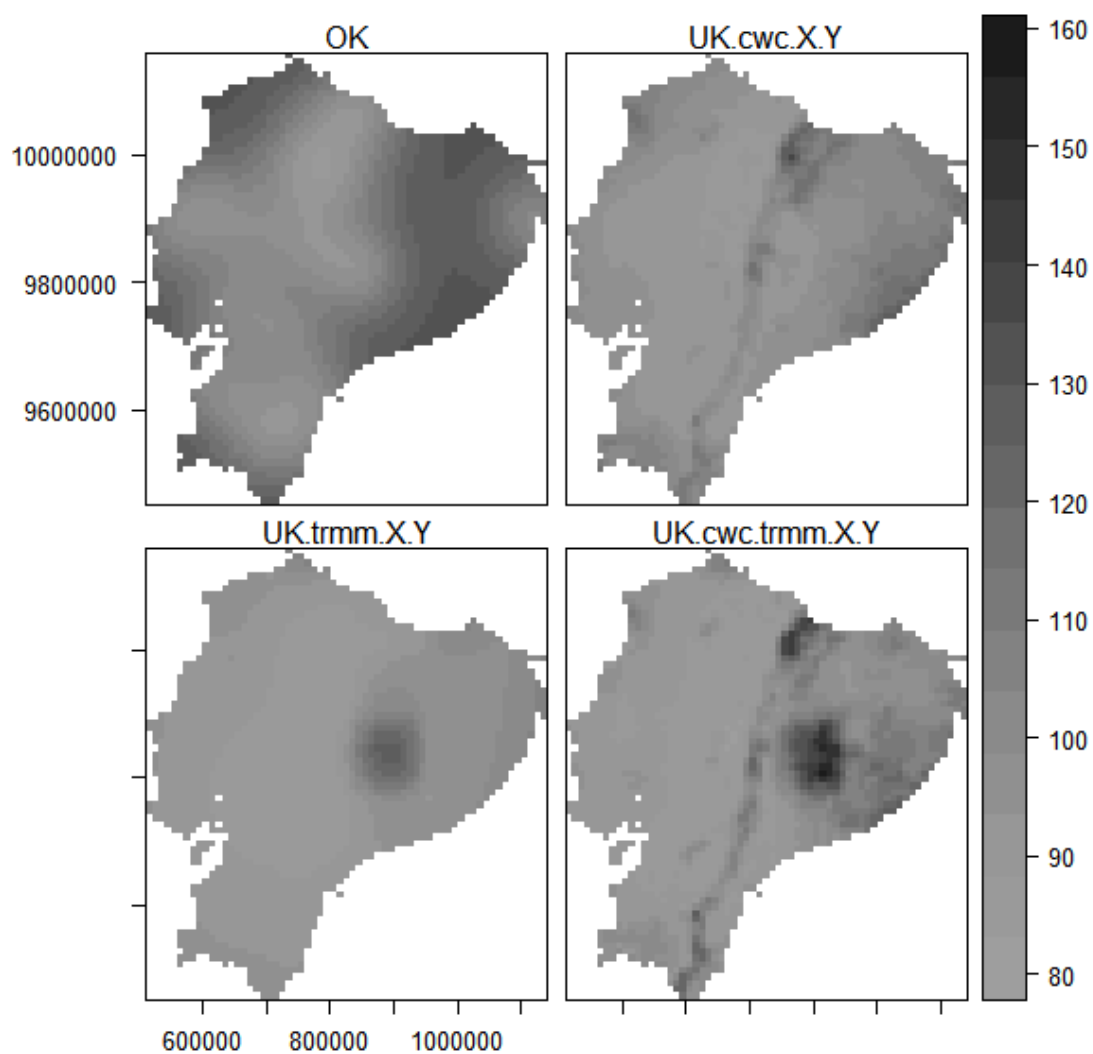
**Figura 9.** Interpolación con kriging ordinario e inverso de la distancia del año 2003.

En la figura 9 se puede observar que la interpolación del año 2003 realizada con kriging ordinario no da una interpolación confiable debido a este puro efecto de pepita. En cambio, el método elegido, Inverso de la Distancia, sí da una buena interpolación.

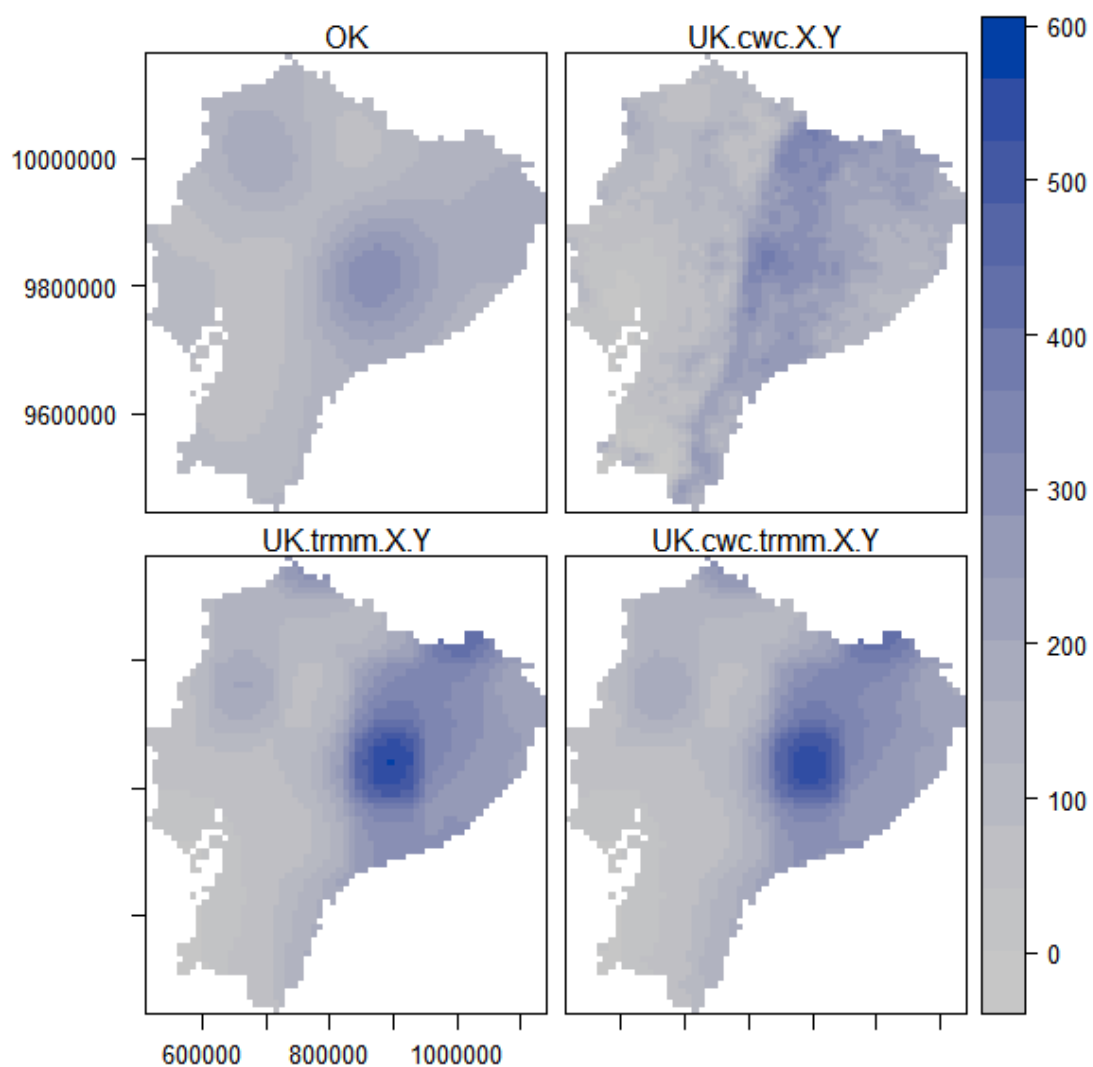
### Interpolaciones de todos los años con los cuatro métodos



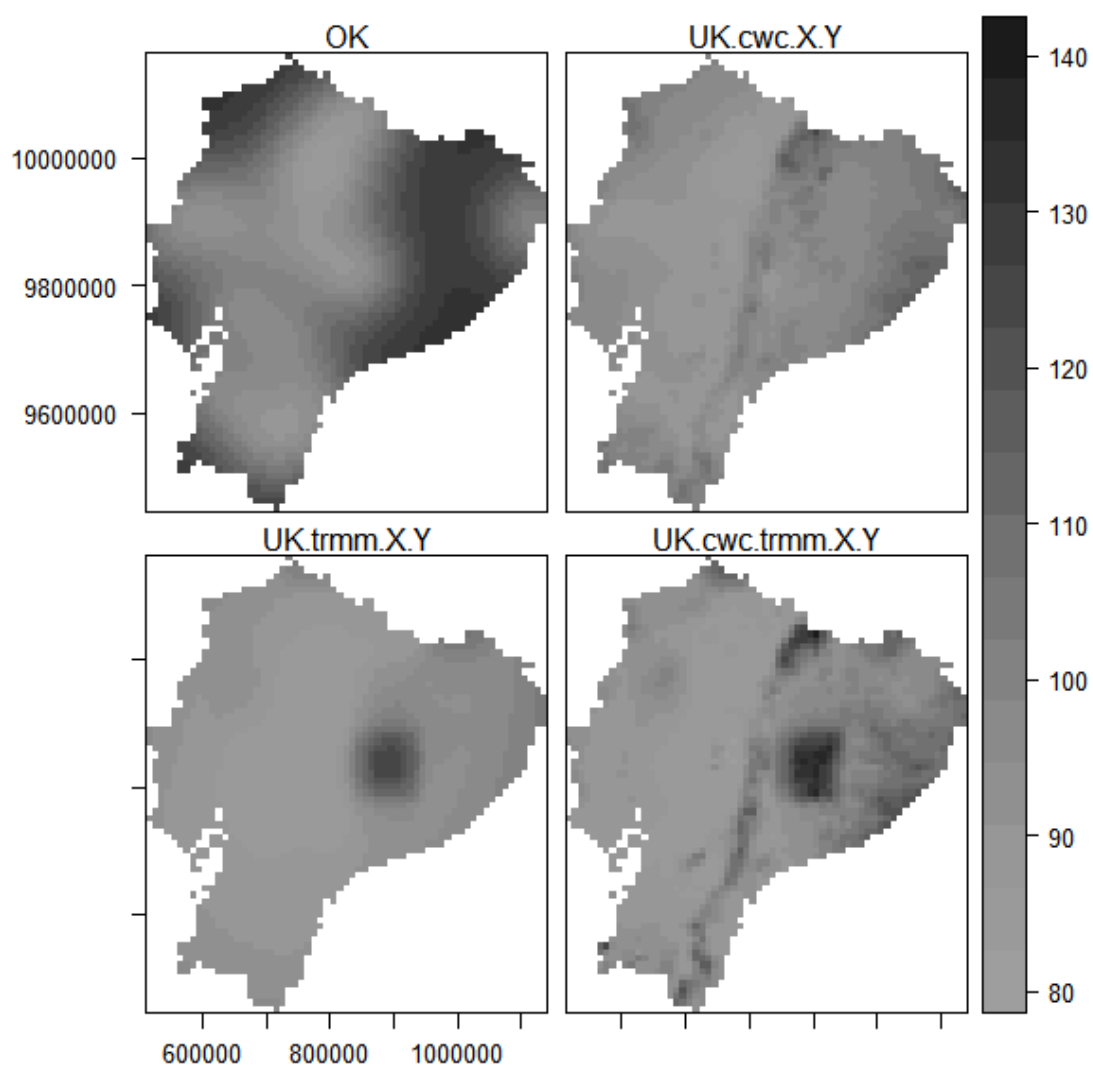
**Figura 10.** Interpolaciones realizadas con los métodos kriging en el año 2004.



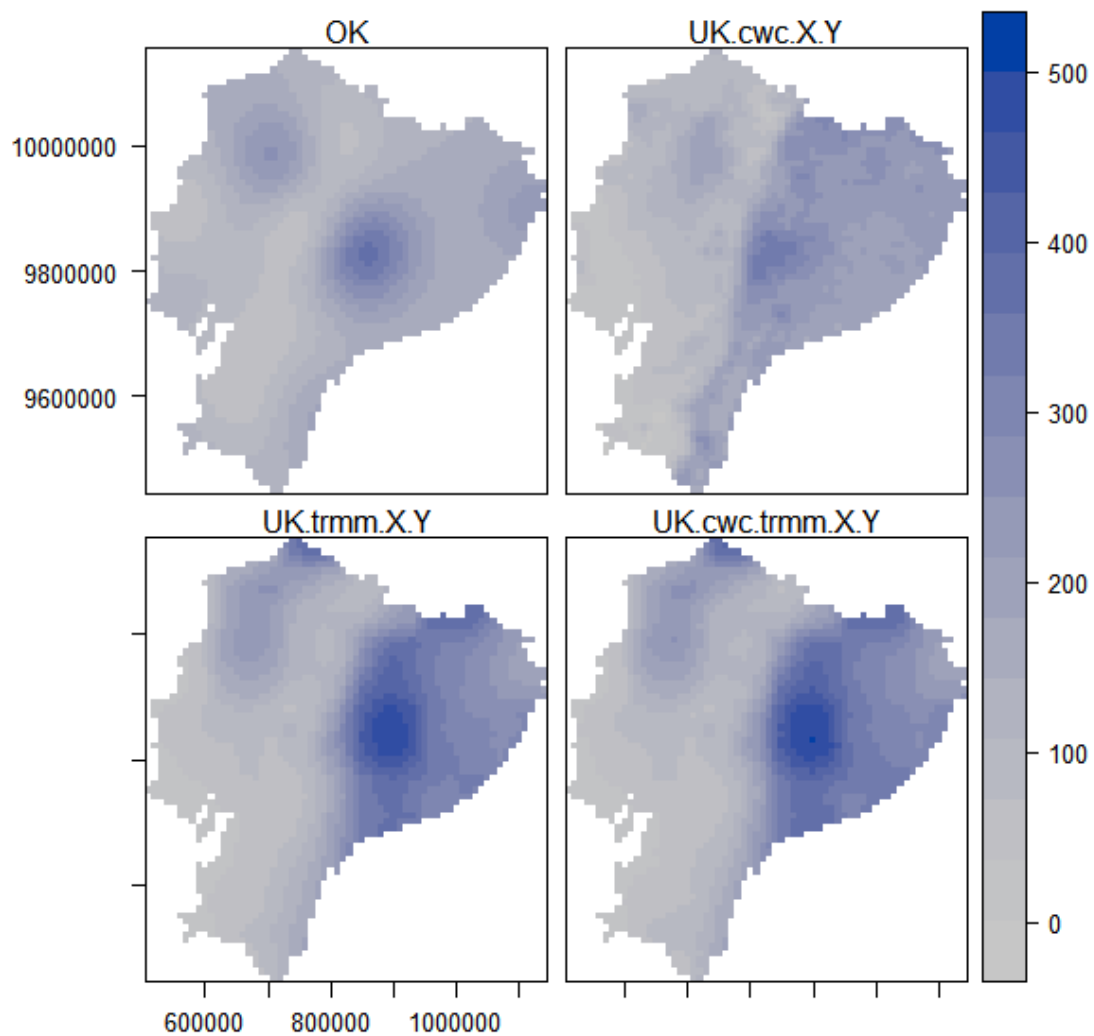
**Figura 11.** Desviaciones estándar de las interpolaciones realizadas con los métodos kriging del año 2004.



**Figura 12.** Interpolaciones realizadas con los métodos kriging en el año 2005.

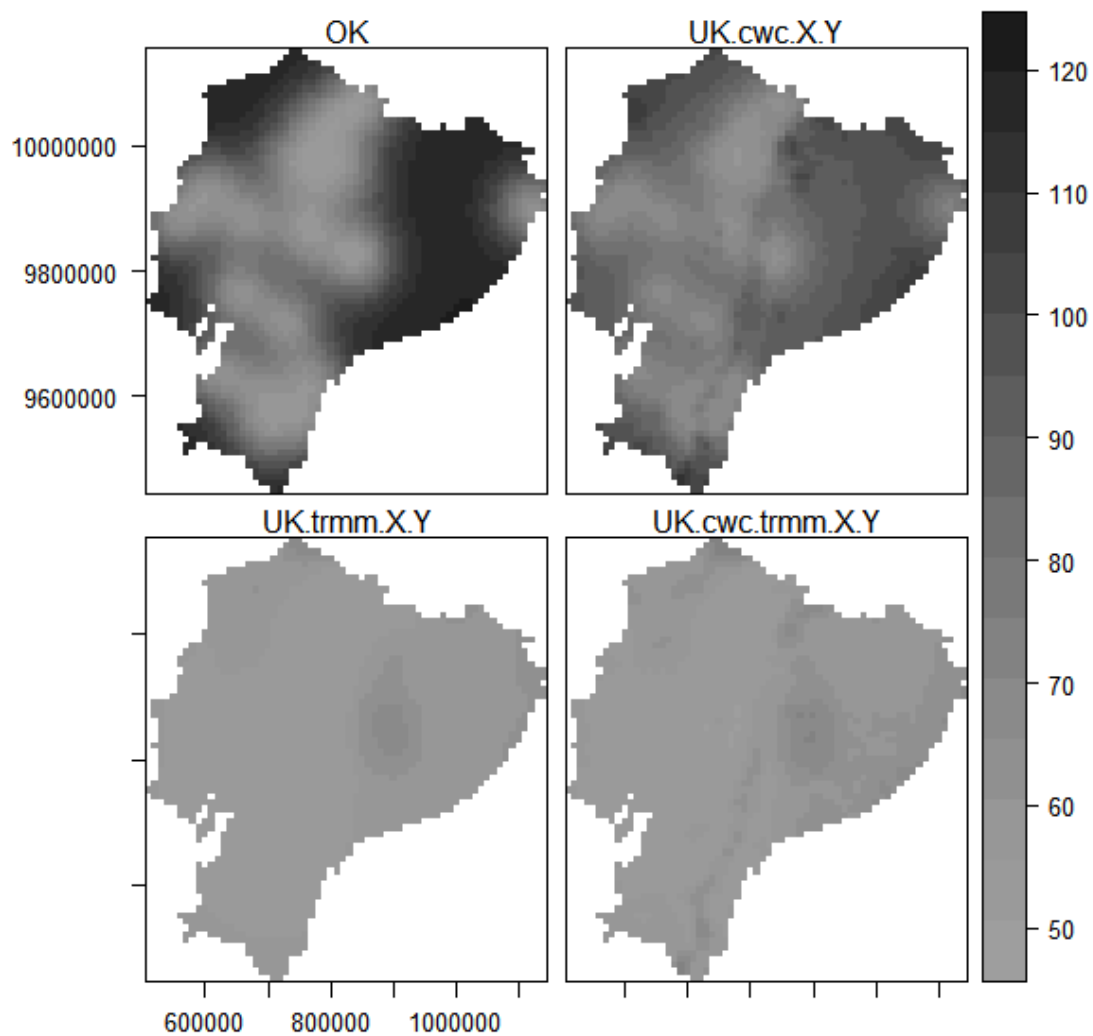


**Figura 13.** Desviaciones estándar de las interpolaciones realizadas con los métodos kriging del año 2005.

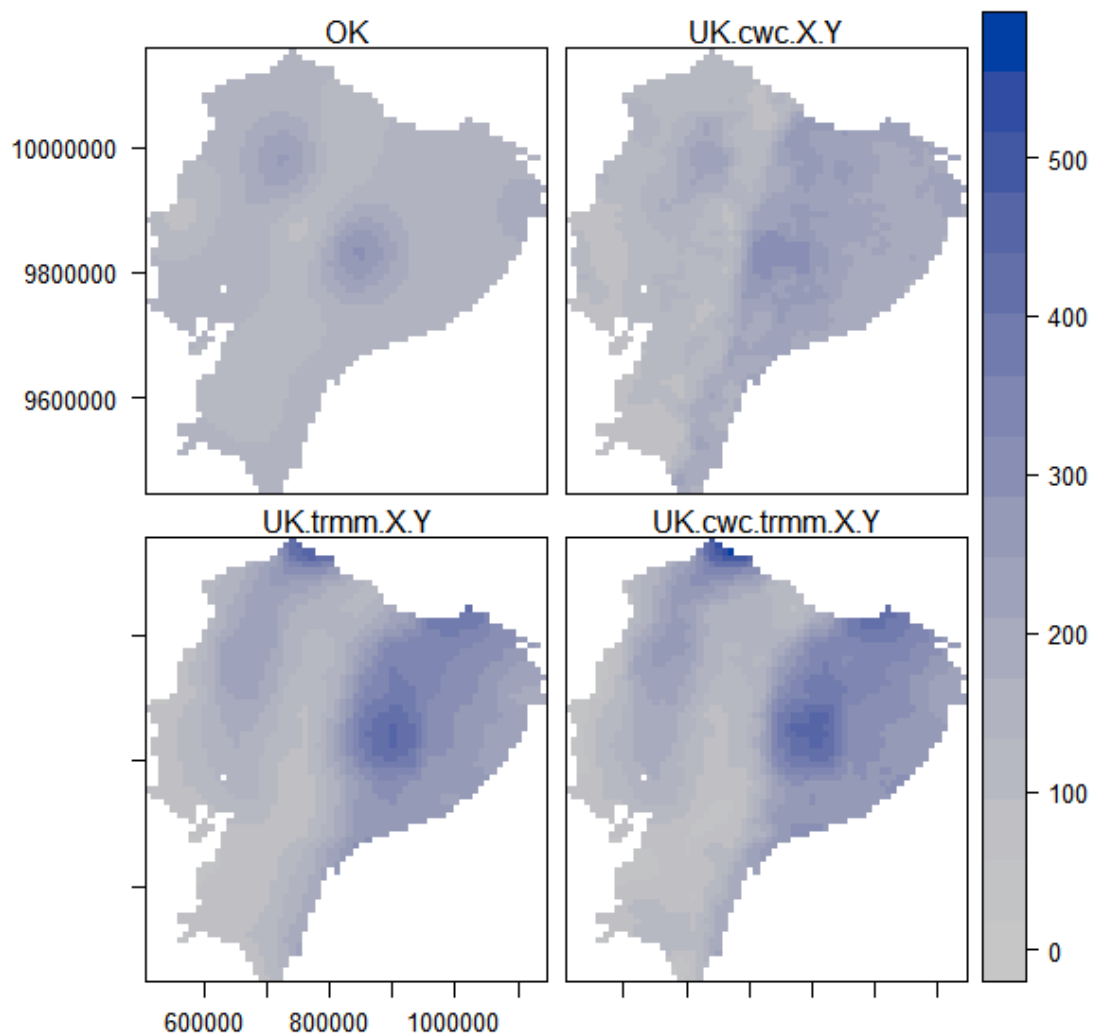


**Figura 14.** Interpolaciones realizadas con los métodos kriging en el año 2007.

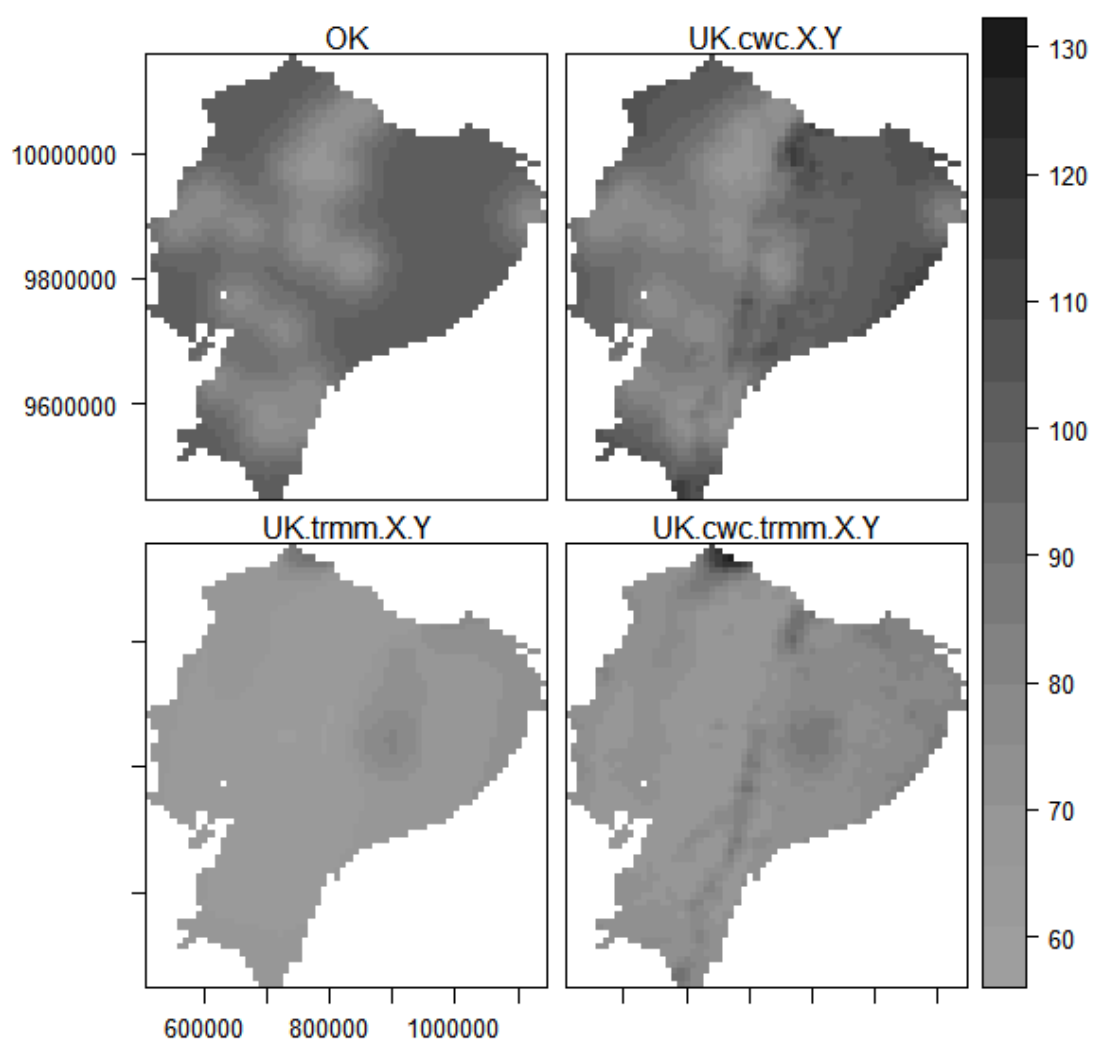




**Figura 15.** Desviaciones estándar de las interpolaciones realizadas con los métodos kriging del año 2007.



**Figura 16.** Interpolaciones realizadas con los métodos kriging en el año 2008.



**Figura 17.** Desviaciones estándar de las interpolaciones realizadas con los métodos kriging del año 2008.